Journal of Iranian Plant Protection Research

https://jpp.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 4, Winter 2023, p. 439-451

Efficiency of Chemical and Physical Hard Water Softening Methods to Reduce the Incompatibility of Hard Water Cations with herbicide Glyphosate

A. Aliverdi[1]*, A. Ghanbari[2], M.H. Rashed-Mohassel[3], M. Nassiri-Mahallati[4], E. Zand[5]

Received: 10-02-2018 Revised: 20-05-2018 Accepted: 30-05-2018 Available Online: 15-02-2023	**How to cite this article:** Aliverdi, A., Ghanbari, A., Rashed Mohasel, M.H., Nasiri Mahalati, M., & Zand, E. (2023). Efficiency of Chemical and Physical Hard Water Softening Methods to Reduce the Incompatibility of Hard Water Cations with herbicide Glyphosate. *Journal of Iranian Plant Protection Research 36*(4): 439-451.(In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/jpp.2021.32208.0

Introduction

Water is the most frequently used carrier for herbicide applications. Thus, the physicochemical properties of water in spray mixture can affect the activity of herbicides. A high concentration of Na+, K+, Ca2+, Mg2+, Fe3+ and other cations in hard water can decrease herbicide efficacy. Weak acid herbicides that have been antagonized by one or more of the above cations include sethoxydim, 2,4-D, 2,4-DB, clethodim, imazethapyr, tralkoxydim, and glufosinate and glyphosate. Approaches to minimize hard water antagonism have included decreasing the spray carrier volume and using water-conditioning additives that have proven effective at ameliorating cation-caused antagonism include ammonium sulfate, ammonium nitrate, potassium phosphate, and citric acid. Passing hard water containing Ca^{2+}, Mg^{2+} or Na^{+} through an external magnetic device results in the nucleation and crystallization of the respective carbonates. As a result, hard water can be softened for a period. Considering that the hardness of Iranian agriculture is increasing and adding an adjuvant to spray solution is also considered to be more environmental contamination, therefore, the physical conversion of hard water to soft water via its passage through a magnetic field is definitely a good alternative. The objectives of this research were to investigate the effect of adding $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3, K_2CO_3, or $Fe_2(CO_3)_3$ to distilled water on glyphosate efficacy to jimsonweed (*Datura stramonium* L.), and to compare the chemical hard water softening methods (ammonium sulfate, ammonium nitrate, citric acid and potassium phosphate) to a new physical hard water softening method (passing carrier through a magnetic field) to Reduce the incompatibility of hard water cations with glyphosate.

Materials and Methods

The seeds of jimsonweed were collected from plants in the fields of Qazvin city, Iran. They were stored in the dark at room temperature until use. Bioassays were conducted in a greenhouse located on the Ferdowsi University of Mashhad, Iran. To increase seed germination before starting the experiment, the seeds were washed every 1 hour for 7 days to remove seed germination inhibitors. Twenty-five seeds were sown at 0.5 cm depth in 2 L plastic pots filled with a mixture of sand, clay loam soil, and peat (1:1:1 by volume). At cotyledon-leaf stage, the seedlings were thinned to four per pot. The pots were irrigated every four days with tap water. Treatments were sprayed at the four-leaf stage. The experiment was arranged as a completely randomized design with four replications as a factorial design with factors of carrier type (distilled water alone or containing 0.5 g L^{-1} of $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3, K_2CO_3, or $Fe_2(CO_3)_3$) and hard water softening method (ammonium sulfate, ammonium nitrate, potassium phosphate, citric acid, and passing through a magnetic field) and glyphosate dose (0, 12.81, 25.62, 51.25, 102.5 and 205 g a.i. ha^{-1}). For magnetizing the carriers, it was passed 10 times through a magnetic treatment device modified from Rashed-Mohassel (30). The mixing order for treatment solutions was (*i*) adding $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3, K_2CO_3, or $Fe_2(CO_3)_3$ to distilled water, then (*ii*) adding/using water

1, 2, 3 and 4– Ph.D. Gratuated and Professors in Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: a.aliverdi@basu.ac.ir)
5- Professor in Department of Weed Research, Plant Protection Research Institute, Tehran, Iran

conditioning method, and after 15 min (*iii*) adding glyphosate. Then, the solutions were sprayed after about 5 min using a calibrated moving boom sprayer at 180 L ha^{-1} at 200 kPa with 11002 flat-fan nozzle. Shoots were harvested four weeks after treatment, dried for 48 h at 70°C, and dry weight was determined. The data of shoot dry weight were subjected to a non-linear regression analysis for determination of ED_{50} values (herbicide dose needed to obtain 50% reduction in dry weight) using the following logarithmic logistic dose-response model. The relative potency (R), the horizontal displacement between the two curves, was also calculated.

Results and Discussion

As judged by the relative potency values given in Table 1, the hard water softening methods decreased the ED_{50} values when distilled water was used as the carrier. Therefore, the activity of glyphosate against jimsonweed was significantly increased in the presence of the hard water softening methods. There were significant differences in performance among hard water softening methods as ammonium sulfate was the most effective method. Glyphosate activity was not decreased when applied in a K_2CO_3 solution but it was decreased when applied in Na_2CO_3, $MgCO_3$, $CaCO_3$ or $Fe_2(CO_3)_3$ solutions. Except potassium phosphate which had only a significant effect at reducing the antagonism in the $CaCO_3$ carrier; all hard water softening methods could restore glyphosate activity in hard water contaminated carriers to efficacy levels comparable to glyphosate alone in distilled water. There was no statistical difference in response between the magnetized carrier and ammonium sulfate when they were used in Na_2CO_3, $MgCO_3$, or $Fe_2(CO_3)_3$ solutions. It is reported that hard water softening methods may adjust the spray solution pH so that more active ingredient can transport across the leaf surface into the plant via ion trapping phenomenon. Ammonium sulfate was the most successful method to ameliorate the decreased glyphosate activity due to antagonism with Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, or Fe^{3+} in the spray solution. By adding ammonium sulfate, the sulfate ion (SO_4^{2-}) conjugates with the hard water cations and removes free cations from solution by forming cation-SO_4 molecule, allowing ammonium ion (NH_4^+) to form glyphosate-NH_4 molecule. A glyphosate-NH_4 molecule diffuses across the cuticle easier and quicker. A mechanism for physical hard water softening method is illustrated in Fig. 2.

Conclusion

Although the physical hard water softening method was not effective as compared to some chemical hard water softening methods (ammonium sulfate and citric acid), from the point of view of economical and agricultural, applying the physical hard water softening method will be benefit because it needs no chemical.

Keywords: Adjuvants, Jimsonweed, Magnetic field

نشریه پژوهش‌های حفاظت گیاهان ایران
https://jpp.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص. ۴۵۱-۴۳۹

کارایی روش‌های شیمیایی و فیزیکی نرم‌سازی آب سخت در کاهش ناسازگاری کاتیون‌های آب سخت با علف‌کش گلایفوسیت

اکبر علی‌وردی[۱*]- علی قنبری[۲]- محمدحسن راشد محصل[۳]- مهدی نصیری محلاتی[۴]- اسکندر زند[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹

چکیده

وقتی آب حامل سم‌پاشی حاوی میزان بالایی از کاتیون‌های تک، دو و یا چند ظرفیتی باشد، کارایی علف‌کش‌های اسیدی ضعیف کاهش خواهد گرفت. در یک آزمایش دُز-پاسخی که در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل اجرا گردید، شش مقدار از علف‌کش گلایفوسیت (مقادیر ۰، ۱۲/۸۱، ۲۵/۶۲، ۵۱/۲۵، ۱۰۲/۵ و ۲۰۵ گرم ماده مؤثره در هکتار) با حامل‌های پاشش آب مقطر و آب مقطر به همراه ۰/۵ گرم در لیتر از کربنات‌های پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم و آهن بر روی علف‌هرز تاتوره پاشیده شد. هر یک از این تیمارها با و بدون کاربرد سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، اسید سیتریک و فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی بکار برده شدند. وقتی آب مقطر به عنوان حامل پاشش استفاده شد، کارایی گلایفوسیت با کاربرد هر یک از روش‌های نرم‌سازی آب سخت به طور معنی‌داری افزایش یافت. در این بین، سولفات آمونیوم مؤثرترین ترکیب مورد استفاده بود که باعث افزایش کارایی ۴/۰۳ برابری نسبت به آب سخت شد. کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره که با حامل پاشش حاوی کربنات پتاسیم بکار برده شده بود کاهش نیافت، ولی کارایی این علف‌کش وقتی با حامل‌های پاشش حاوی کربنات کلسیم، منیزیم، سدیم و آهن بکار برده شده بود به طور معنی‌داری کاهش یافت. در بین انواع کاتیون‌ها، حامل پاشش حاوی کاتیون آهن بیشترین اثر منفی را بر کارایی گلایفوسیت داشت. بجز فسفات پتاسیم که فقط دارای تأثیر کمی در تقلیل اثرات ناسازگار حامل پاشش حاوی کربنات کلسیم داشت، سایر روش‌های نرم‌سازی آب سخت قادر بودند تا بر اثرات منفی حضور کاتیون‌ها در آب سخت به طور کامل فایق آیند. زمانی که از حامل‌های پاشش حاوی کربنات سدیم، منیزیم و آهن استفاده شد، تفاوت معنی‌داری بین عملکرد سولفات آمونیوم و میدان مغناطیسی در نرم‌سازی آب سخت مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: تاتوره، مواد افزودنی، میدان مغناطیسی

مقدمه

عمدتاً، از آب به‌عنوان حامل پاشش برای کاربرد علف‌کش‌ها استفاده می‌شود. از این‌رو، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب مورد استفاده در سم‌پاشی می‌تواند کارایی علف‌کش‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Shahverdi *et al*., 2010). محققان ثابت کرده‌اند که حضور مقادیر بالایی از کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، منگنز، روی و آهن در آب سم‌پاشی می‌تواند کارایی علف‌کش‌ها را کاهش دهد (Patton *et al*., 2016). در این رابطه، عمدتاً علف‌کش‌های اسیدی ضعیف همچون ستوکسیدیم[۶] (Matysiak and Nalewaja, 1999)، کلتودیم[۷] (Nandula *et al*., 2007)، توفوردی[۸] (Roskamp

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی سابق دکتری و استادان گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۵- استاد موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور، بخش تحقیقات علف‌های هرز، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.aliverdi@basu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jpp.2021.32208.0

6- Sethoxydim
7- Clethodim
8- 2,4-D

(Patton *et al.*, 2016 *et al.*, 2013a) و دایکمبا[1] (Roskamp *et al.*, 2013a)، توفوردی‌بی[2] (Somervaille et al., 2012)، ایمازتاپیر[3] (Aliverdi *et al.*, 2014)، ترالکوکسیدیم[4] (Devilliers *et al.*, 2001)، گلیفوزینت آمونیوم[5] (Soltani *et al.*, 2011) و گلایفوسیت[6] (Mahoney *et al.*, 2014) حساسیت بسیار بالایی به حضور کاتیون‌های مذکور در آب سخت را نشان داده‌اند. به همین دلیل است که کاربرد مخلوط عناصر ریزمغذی منیزیم، منگنز، روی و آهن به همراه علف‌کش‌های اسیدی ضعیف توصیه نمی‌شود (Scroggs *et al.*, 2009). استفاده از آب سخت به منظور سمپاشی می‌تواند به دلیل تشکیل کمپلکس کاتیون-توفوردی باعث ایجاد رسوب‌های سختی در درون اجزای مختلف سمپاش شود. در چنین وضعیتی، خسارت جبران‌ناپذیری به تجهیزات سمپاشی وارد خواهد شد چون رسوب‌زدایی بخش‌های داخلی سمپاش بسیار مشکل و گاهاً غیر ممکن است (Somervaille et al., 2012). راهکارهایی جهت کاهش ناسازگاری آب سخت با علف‌کش‌های اسیدی ضعیف ارائه شده است که عبارتند از کاهش حجم حامل پاشش (Wills *et al.*, 1998) و افزودن مواد نرم‌کننده آب سخت (Devkota and Johnson, 2016). در تحقیقات قبلی، کارآمدی سولفات آمونیوم (Mahoney *et al.*, 2014)، نیترات آمونیوم، فسفات پتاسیم (Wills *et al.*, 1998) و اسید سیتریک (Thelen *et al.*, 1995) به عنوان مواد افزودنی نرم‌کننده آب سخت در کاهش ناسازگاری کاتیون‌های آن با علف‌کش گلایفوسیت به اثبات رسیده است.

در منابع حوزه علوم پایه، محققان متعددی ثابت کرده‌اند که عبور دادن آب سخت حاوی آنیون کربنات و کاتیون‌های کلسیم (Madsen, 2004)، منیزیم و سدیم (Bin *et al.*, 2011) از بین یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی باعث بلورسازی کربنات‌های نمکی مربوطه در درون محیط آب می‌شود. در نتیجه، آب سخت برای مدت زمانی در حدود ۲۰۰ ساعت به آب نرم تبدیل می‌شود (Coey and Cass, 2000). علاوه بر این، با عبور دادن آب از بین یک میدان مغناطیسی تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب از جمله ظرفیت حل‌کنندگی[7] (Moosa *et al.*, 2015)، هدایت الکتریکی[8] (Akopian and Aĭrapetian, 2005)، کشش سطحی[9] (Rashed-Mohassel *et al.*, 2009)، چگالی[10] (Chang and Weng, 2006)، تبخیرپذیری[11] (Toledo *et al.*, 2008) و اسیدیته[12] (Fathi *et al.*, 2006) رخ می‌دهد. تمامی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مذکور در کارایی علف‌کش‌های شاخ و برگ مصرف تأثیرگذار هستند (Rao, 2000).

با توجه به اینکه به میزان سختی آب‌های کشاورزی ایران روز به روز افزوده می‌شود (Osati and Nahvinia., 2016) و نیز افزودن هر نوع ماده افزودنی به محلول سم به نوعی آلودگی بیشتر محیط زیست محسوب می‌شود (Rashed-Mohassel et al., 2009)، بنابراین، تبدیل فیزیکی آب سخت به آب نرم از طریق عبور دادن آن از بین میدان مغناطیسی قطعاً گزینه کاربردی مناسبی خواهد بود. در این تحقیق، علاوه بر ارزیابی شدت ناسازگاری هر یک از کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و آهن موجود در آب سخت بر کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره (*Datura stramonium* L.)، مقایسه‌ی بین روش‌های شیمیایی نرم‌سازی آب سخت (افزودن سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، فسفات پتاسیم و اسید سیتریک) با روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت (عبور دادن حامل پاشش از میدان مغناطیسی) نیز انجام گرفت. علف‌هرز تاتوره گیاهی یکساله از تیره سیب زمینی است که به عنوان گیاهی مهاجم در طی چند سال اخیر در مزارع چغندرقند، حبوبات، سبزی و صیفی، پنبه و سویا و سایر دانه-های روغنی محسوب می‌شود. گزارش‌ها نشان داده است که افزایش تراکم تاتوره از ۱ به ۳۲ بوته در ۹/۱ متر از ردیف، کاهش ۹۲ درصدی در تعداد غوزه پنبه را سبب می‌شود (Khanjani *et al.*, 2010). از آنجایی که منشاء کاتیون‌های ناسازگار با علف‌کش‌ها ممکن است سطح برگ خود علف‌هرز باشد (Young *et al.*, 2003) و براساس هال و همکاران (Hall *et al.*, 2000) که بیان داشتند که سطح برگ تاتوره دارای میزان کلسیم پایینی است، از این‌رو، تاتوره صرفاً به‌عنوان یک گیاه محک برای درک وجود اثرات تیمارها انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

کپسول‌های شکافته تاتوره از روی گیاهان مادری در مزارع اطراف شهر قزوین جمع‌آوری شدند. پس از تخلیه بذرها از کپسول‌ها، بذرها در تاریکی تا شروع آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند. آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. به‌منظور یکنواختی و سهولت در جوانه‌زنی و سبزشدن گیاهچه‌های تاتوره، ابتدا بذرها در درون محلول هیپوکلریت‌سدیم ۵ درصد به مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس با آب شرب شهری

1- Dicamba
2- 2,4-DB
3- Imazethapyr
4- Tralkoxydim
5- Glufosinate-ammonium
6- Glyphosate
7- Solvent capacity
8- Conductivity
9- Surface tension
10- Viscosity
11- Evaporability
12- pH

شستشو شدند. بذرها درون یخچال در دمای ۴ تا ۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و در طول مدت ۷ روز هر یک ساعت با آب شرب شهری شستشو شدند. با این روش، مواد بازدارنده جوانه‌زنی موجود در پوسته بذرها (Andersen, 1968) از بین رفته و موجبات سبزشدن ۸۸ درصدی بذرها پس از کاشت فراهم شد. تعداد ۲۵ بذر در سطح خاک گلدان ۲ لیتری حاوی خاک، خاکبرگ و ماسه بادی با نسبت حجمی برابر قرار داده شدند. سپس، بر روی بذرها به اندازه ۰/۵ سانتی‌متر خاک ریخته شد. گلدان‌ها هر چهار روز یکبار آبیاری شدند. در مرحله برگ لپه‌ای، گیاهچه‌ها به حدود ۴ گیاهچه در هر گلدان تنک شدند. دمای گلخانه در مدت رشد، بین ۲۷ تا ۳۶ درجه سانتی‌گراد در طول روز و ۱۷ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد در طول شب در نوسان بود. گیاهان در مرحله ۴ برگی کامل با استفاده از سم‌پاش متحرک ریلی مجهز به نازل بادبزنی معمولی ۱۱۰۰۲ با خروجی ۲۰۴ لیتر در هکتار با فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال تحت تیمار قرار گرفتند. دما در حین سم‌پاشی ۳ ± ۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶ ± ۴۴ درصد بودند.

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام گرفت. فاکتور غلظت علف‌کش گلایفوسیت (رانداپ ۴۱٪ مایع قابل حل در آب، آریا شیمی، ایران) شامل غلظت‌های ۰، ۱۲/۸۱، ۲۵/۶۲، ۵۱/۲۵، ۱۰۲/۵ و ۲۰۵ گرم ماده مؤثره در هکتار، فاکتور حامل پاشش شامل آب مقطر و آب سخت حاوی هر یک از کاتیون‌های Fe^{3+}، Ca^{2+}، Mg^{2+}، K^{+} و Na^{+} و فاکتور روش نرم‌سازی آب سخت شامل کاربرد و عدم کاربرد سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، اسید سیتریک، فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی بود. ترتیب مخلوط‌سازی مواد به این صورت بود که ابتدا، کربنات نمکی به آب مقطر افزوده شد؛ سپس، روش نرم‌سازی آب سخت اعمال شد؛ و در نهایت و پس از ۱۵ دقیقه انتظار، مقادیر علف‌کش افزوده شد (Aliverdi et al., 2014). براساس اطلاعات موجود، سولفات آمونیوم [$(NH_4)_2SO_4$]، نیترات آمونیوم [NH_4NO_3] (Soltani et al., 2011)، اسید سیتریک [$C_6H_8O_7$] (Thelen et al., 1995) و فسفات پتاسیم [$KHPO_4$] (Wills et al., 1998) به میزان ۲۰ گرم برای هر لیتر محلول پاشش استفاده شد. برای تهیه آب سخت حاوی هر یک از کاتیون‌های Fe^{3+}، Ca^{2+}، Mg^{2+}، K^{+} و Na^{+}، به‌طور جداگانه مقدار ۰/۵ گرم از نمک‌های کربناتی آهن ($Fe_2(CO_3)_3$)، کلسیم ($CaCO_3$)، منیزیم ($MgCO_3$)، پتاسیم (K_2CO_3) و سدیم (Na_2CO_3) به یک لیتر آب مقطر اضافه شد (Patton et al., 2016). با افزودن این نمک به آب مقطر، هر یک از حامل‌ها حاوی آنیون کربنات (CO_3^{2-}) و کاتیون‌های مذکور بودند. به‌منظور مغناطیسی‌سازی، حامل‌های پاشش را ۱۰ بار از میدان مغناطیسی عبور دادیم. آرایش میدان مغناطیسی و اندازه کانال عبور محلول پاشش و قطعات آهن‌ربا در شکل ۱ نمایش داده شده است. با اصلاح روش راشدمحصل و همکاران (Rashed-Mohassel et al., 2009)، ابتدا دو قطعه از آهن‌ربا از سمت قطب‌های مخالفشان بر روی دو طرف کانال عبور قرار گرفت و سپس دو قطعه دیگر آهن‌ربا بر روی قطعات قبلی قرار داده شدند. همچنین، از آنجایی که با نزدیک کردن آهن‌رباهای دو طرف کانال عبور به یکدیگر شدت میدان مغناطیسی تقویت می‌شود؛ از اینرو، مقطع کانال عبور تا حد امکان باریک (۱ میلی‌متر در عرض) تهیه شد. شدت میدان مغناطیسی در درون کانال عبور ۰/۷ تسلا بود که با استفاده از تسلامتر لوپ‌دار مدل 1-ST AlphaLab اندازه‌گیری شد. دبی عبوری محلول از مقطع حدود ۱/۸ لیتر در دقیقه بود. علاوه براین، از آنجایی که عبور پرتوهای مغناطیسی از فلز مس به خوبی انجام می‌گیرد (Gabrielli et al., 2001)؛ از این‌رو، از لوله‌ای از همین جنس برای تهیه کانال عبور استفاده شد.

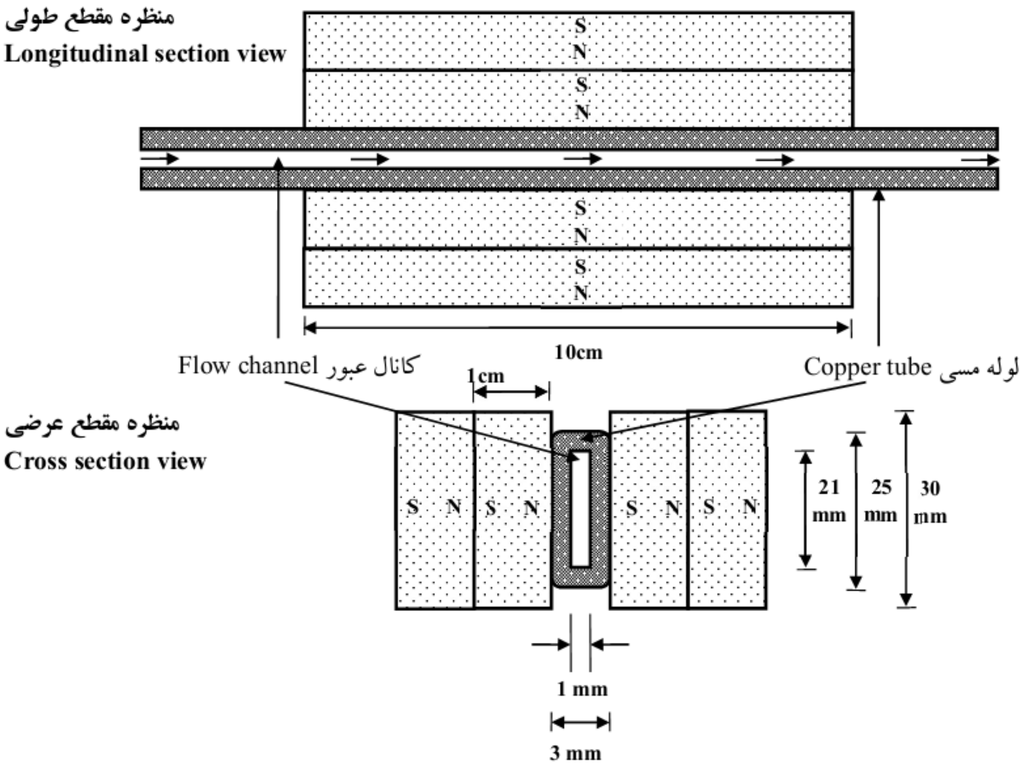
چهار هفته پس از سمپاشی، گیاهان تیمار شده از سطح خاک برداشت شدند و وزن خشک آنها پس از ۴۸ ساعت قراردهی در درون آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد توزین شد. داده‌های بدست آمده تقسیم بر ۴ (تعداد بوته در هر گلدان) شدند. پاسخ وزن خشک علف‌هرز تاتوره به تیمارها با تکنیک آنالیز رگرسیون غیرخطی با مدل چهار پارامتری لجستیک (معادله ۱) و با استفاده از نرم‌افزار R نسخه ۲،۶،۲ تجزیه و تحلیل شد (Ritz et al., 2015):

$$Y = \frac{C+(D-C)}{\{1+exp[B(logX-logED)]\}} \quad \text{معادله ۱}$$

در این رابطه: Y بیانگر وزن خشک تاتوره، D و C حد مجانب بالا و پایین وزن خشک در مقادیر صفر و بی‌نهایت گلایفوسیت، ED_{50} بیانگر مقدار علف‌کش لازم (x) برای کاهش ۵۰ درصدی در وزن خشک بین حد مجانب بالا و پایین است و B متناسب با شیب منحنی در محدوده ED_{50} می‌باشد. از آنجایی که اهمیت پارامتر ED_{50} در مطالعات بهینه‌سازی کارایی علف‌کش‌ها به روش دُز–پاسخ بیشتر از سایر پارامترها (مانند ED_{10} و ED_{90}) است (Ritz et al., 2015)، از اینرو؛ فقط نتایج مربوط به پارامتر ED_{50} ارائه شد. پارامتر ED_{50} بیانگر ویژگی موسوم به فعالیت ذاتی علف‌کش در گیاه است. به طوری که از نسبت آنها برای ارزیابی جابه‌جایی افقی منحنی در اثر افزودن مواد افزودنی استفاده می‌شود که به پتانسیل نسبی (R) موسوم است که براساس معادله ۲ محاسبه می‌شود (Ritz et al., 2015):

$$R = \frac{ED_{50}\ a}{ED_{50}\ b} \quad \text{معادله ۲}$$

در این رابطه: در صورت این کسر مقدار ED_{50} علف‌کش بدون روش نرم‌سازی آب سخت و در مخرج این کسر مقدار ED_{50} علف‌کش با اعمال یک روش نرم‌سازی آب سخت قرار می‌گیرد. اگر R برابر یک باشد، اعمال روش نرم‌سازی هیچ تأثیر معنی‌داری ندارد. اگر پتانسیل نسبی بزرگتر از یک باشد، کارایی افزایش یافته و اگر پتانسیل نسبی کوچکتر از یک باشد، برعکس آن صادق است.



شکل ۱- ابزار تیمار مغناطیسی (با اصلاح روش راشدمحصل و همکاران (Pratt *et al*., 2003)

N و S به‌ترتیب نشان‌دهنده قطب‌های شمال و جنوب آهن‌ربا هستند. شدت میدان مغناطیسی برابر ۰/۷ تِسلا بود.

Figure 1. Magnetic treatment device (modified from Rashed-Mohassel *et al*. (31))

N and S are the North and South poles, respectively. The strength of the magnetic field was 0.7 T.

نتایج و بحث

کاربرد تمامی روش‌های نرم‌سازی آب شیمیایی (سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، اسید سیتریک و فسفات پتاسیم) و فیزیکی (عبوردهی حامل از میدان مغناطیسی) موجب کاهش مقدار ED_{50} گلایفوسیت در کنترل علف‌هرز تاتوره شد (جدول ۱). به‌طورکلی، مقادیر پتانسیل نسبی (R) زمانی که گلایفوسیت به‌همراه این روش‌های نرم‌سازی آب بکار برده شد از عدد ۱ بیشتر بود (جدول ۱)، که نشان دهنده افزایش قابل توجهی در کارایی این علف‌کش به وسیله این روش‌هاست. براساس داده‌های پتانسیل نسبی، بیشترین و کمترین اثر به ترتیب مربوط به سولفات آمونیوم و فسفات پتاسیم بودند.

در این رابطه، بین فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. به منظور ایجاد درک مناسب از داده‌های پتانسیل نسبی، به عنوان نمونه باید ذکر شود که کارایی ۱ گرم در هکتار گلایفوسیت به همراه سولفات آمونیوم برابر کارایی ۴/۰۳ گرم در هکتار گلایفوسیت به تنهایی است. براساس داده‌های پتانسیل نسبی، رتبه‌بندی روش‌های نرم‌سازی آب در بهبود کارایی گلایفوسیت در کنترل علف‌هرز تاتوره به صورت: سولفات آمونیوم (۴/۰۳) < اسید سیتریک (۲/۸۳) ≤ نیترات آمونیوم (۲/۳۷) < میدان مغناطیسی (۲/۱۱) ≤ فسفات پتاسیم (۱/۹۹) بود. هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین مقادیر پارامتر شیب (b) منحنی‌های دُز-پاسخ مشاهده نشد (داده‌ها نشان داده نشده است). به عبارتی دیگر، منحنی‌های علف‌کش تنها و همراه با روش‌های نرم‌سازی آب دارای شیب برابری هستند. براساس تحقیق کودسک و ماتیاسین (Kudsk and Mathiassen, 2007)، در زمانی که اختلاف معنی‌داری بین شیب منحنی‌ها وجود نداشته باشد، آنها را می‌توان موازی در نظر گرفت. در چنین وضعیتی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش‌های نرم‌سازی آب مورد استفاده در این تحقیق از نظر زیستی به خودی‌خود روی علف‌هرز تاتوره غیرفعال می‌باشند. پیش از این، محققان ثابت کرده‌اند که سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم موجب افزایش جذب و بهبود کارایی گلایفوسیت شده است (Young *et al*., 2003; Mahoney *et al*., 2014).

جدول ۱- مقادیر ED_{50} برای گلایفوسیت پاشیده شده با آب مقطر در پاسخ به کاربرد روش‌های نرم‌سازی آب به منظور کنترل وزن خشک تاتوره

Table 1- ED_{50} values of glyphosate applied with distilled water in response to water softening methods application to control the dry weight of jimsonweed

روش نرم‌سازی آب Water conditioner	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R
شاهد Control	35.47 (4.31)	1.00
سولفات آمونیوم Ammonium sulfate	8.81 (1.71)	4.03
نیترات آمونیوم Ammonium nitrate	14.98 (1.28)	2.37
اسید سیتریک Citric acid	12.53 (1.77)	2.83
فسفات پتاسیم Potassium phosphate	17.83 (1.78)	1.99
میدان مغناطیسی Magnetic field	16.76 (1.76)	2.11

اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد هستند.

The standard errors are in parentheses.

افزودن سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم به محلول پاشش یون آمونیوم ایجاد می‌کند. این یون با تشدید مکانیسم تله یونی، موجب افزایش عبور علف‌کش‌های اسیدی ضعیف از غشاء سلول گیاهی شده و به بهبود کارایی آنها منجر می‌شود (Thelen *et al*., 1995). حلالیت علف‌کش‌های دارای خاصیت اسیدی ضعیف (مانند گلایفوسیت) با اسیدیته محلول پاشش تغییر می‌کند. این نوع علف‌کش‌ها وقتی در محلولی با اسیدیته پایین قرار می‌گیرند (جایی که پروتون زیاد است)، تمایل به تجمیع با پروتون داشته و این عمل سبب آب‌گریزی و تسهیل و تسریع نفوذ آنها از عرض کوتیکول و غشاء سلولی می‌شود. این گونه علف‌کش‌ها در داخل سلول (جایی که پروتون به دلیل پمپاژ آن به بیرون سلول نسبتاً کمیاب است) پروتون از دست می‌دهند که این امر باعث آب‌دوستی یا حلالیت آنها در آب درون سلولی می‌شود. بنابراین، علف‌کش‌های با خاصیت اسیدی ضعیف به این طریق در سلول (یا در آوندهای آبکش) به دام افتاده و تجمع می‌یابند (Thelen *et al*., 1995). علاوه براین، ثابت شده است که کاربرد سولفات آمونیوم یا نیترات آمونیوم موجب کاهش اسیدیته محلول پاشش می‌شوند (Shahverdi *et al*., 2010). کاهش اسیدیته محلول پاشش به وسیله این مواد افزودنی نیز سبب تشدید مکانیسم تله یونی می‌شود (Thelen *et al*., 1995). پنر (Penner, 2006) بیان داشت که سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم می‌توانند کشش سطحی محلول پاشش را نیز کاهش داده و از این طریق موجب نشست و نگهداشت بیشتر پاشش بر روی سطح برگ هدف می‌شوند. به نظر می‌رسد که اسید سیتریک نیز با کاهش اسیدیته محلول پاشش سبب تشدید مکانیسم تله یونی شده و از این طریق باعث بهبود کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره شده است. افزایش کارایی علف‌کش‌های گلایفوسیت در کنترل تاتوره با استفاده از میدان مغناطیسی می‌تواند به دو دلیل باشد. اول اینکه، مغناطیسی‌سازی حامل سبب کاهش کشش سطحی آب (Amiri and Dadkhah, 2006) و محلول علف‌کش (Rashed-Mohassel *et al*., 2009) می‌شود. کاهش کشش سطحی، علاوه بر این که باعث نشست بیشتر قطره‌ها بر روی سطح برگ می‌شود، بلکه موجب کاهش زاویه تماس قطره با سطح برگ نیز می‌شود که این عمل باعث افزایش نفوذ کوتیکولی و روزنه‌ای می‌شود (Rashed-Mohassel *et al*., 2009). دوم اینکه، با کاهش اسیدیته محلول پاشش تحت اثر میدان مغناطیسی (Tai *et al*., 2008)، نفوذ علف‌کش‌های با خاصیت اسیدی ضعیف از عرض کوتیکول و غشاء سلول گیاهی به سبب تشدید مکانیسم تله یونی تسهیل و تسریع می‌شود. در مقایسه با حامل پاشش آب مقطر، حامل‌های پاشش آب مقطر حاوی نمک‌های کربناتی مختلف باعث افزایش معنی‌داری در مقدار گلایفوسیت برای کنترل ۵۰ درصدی تاتوره شدند (جدول ۲). به‌طورکلی، داده‌ها نشان می‌دهند که مقادیر پتانسیل نسبی (R) زمانی که علف‌کش با آب مقطر حاوی نمک‌های کربناتی بکار برده شده بود از عدد ۱ کمتر است، که نشان دهنده اثرات ناسازگار این کاتیون‌ها بر کارایی علف‌کش است.

جدول ۲- مقادیر ED_{50} برای گلایفوسیت پاشیده شده با آب مقطر یا آب مقطر حاوی نمک‌های کربناتی مختلف به منظور کنترل وزن خشک تاتوره

Table 2- ED_{50} values of glyphosate applied with distilled water or distilled water + various carbonate salts to control the dry weight of jimsonweed

حامل پاشش Spray carrier	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R
آب مقطر Distilled water	35.47 (4.31)	1.00
آب مقطر + کربنات پتاسیم Distilled water + K_2CO_3	44.21 (5.36)	0.80
آب مقطر + کربنات سدیم Distilled water + Na_2CO_3	55.08 (11.93)	0.64
آب مقطر + کربنات منیزیم Distilled water + $MgCO_3$	70.12 (8.53)	0.50
آب مقطر + کربنات کلسیم Distilled water + $CaCO_3$	65.32 (8.46)	0.54
آب مقطر + کربنات آهن Distilled water + $Fe_2(CO_3)_3$	89.49 (10.90)	0.39

اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد هستند.

The standard errors are in parentheses.

براساس داده‌های پتانسیل نسبی، اگرچه بین شدت اثر ناسازگار کاتیون‌های منیزیم، کلسیم و آهن و نیز بین شدت اثر ناسازگار کاتیون‌های پتاسیم و سدیم تفاوت معناداری مشاهده نشد، ولی بیشترین و کمترین اثر هم‌کاهی به ترتیب به وسیله کاتیون‌های آهن و پتاسیم مشاهده شد. براساس داده‌های پتانسیل نسبی، رتبه‌بندی کاتیون‌ها در کاهش کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره به صورت: آهن ≤ منیزیم ≤ کلسیم < سدیم ≤ پتاسیم بود. تحقیقات قبلی نیز ثابت کرده‌اند که کاتیون‌های فلزی موجود در آب سخت سبب کاهش کارایی علف‌کش‌های اسیدی ضعیف می‌شوند (Soltani *et al.*, 2011). به طوری که محققان گزارش کردند که کاتیون‌های کلسیم (Young *et al.*, 2003)، منگنز (Bernards *et al.*, 2005) ، آهن، روی، منیزیم، سدیم و پتاسیم (Nalewaja and Matysiak, 1991) موجود در آب سخت باعث کاهش کارایی گلایفوسیت می‌شود. علف-کش‌هایی که خاصیت اسید ضعیفی دارند، مثل گلایفوسیت، در محلول آب به بخش‌های آنیونی (یعنی جزء اسیدی آنها) و کاتیونی (یعنی یک پروتون) تفکیک می‌شوند. بخش آنیونی این علف‌کش‌ها با کاتیون‌های فلزی موجود در آب سخت پیوند برقرار کنند. در نتیجه کمپلکس کاتیون–علف‌کش به وجود می‌آید (شکل ۲) که نسبت به مولکول علف‌کش نامحلول بوده و از طریق برگ گیاهان به‌خوبی جذب نمی‌شود (Penner, 2006). هافمن و همکاران (Hoffmann *et al.*, 2008) نیز ثابت کردند که با افزایش سختی آب (حاوی کربنات کلسیم)، اندازه قطره‌های پاشش افزایش می‌یابد و این امر باعث کاهش نشست قطره‌ها روی برگ و متعاقباً موجب کاهش کارایی علف‌کش می‌شود. شدت اثر ناسازگار کاتیون‌ها بر فعالیت زیستی گلایفوسیت به ظرفیت کاتیونی آنها بستگی داشت (جدول ۲).

به عبارتی دیگر، شدت اثر ناسازگار کاتیون‌های سه ظرفیتی (Fe^{3+}) بیشتر از کاتیون‌های دو ظرفیتی (Ca^{2+} و Mg^{2+}) و آنها نیز بیشتر از کاتیون‌های تک ظرفیتی (K^+ و Na^+) بود. احتمالاً این به آن دلیل است که هر سه عدد مولکول علف‌کش می‌تواند به وسیله یک کاتیون آهن خنثی شود. در حالی که هر یک عدد مولکول علف‌کش می‌تواند به وسیله یک کاتیون سدیم خنثی شود. این نتایج با یافته‌های نالواجا و ماتیساک (Nalewaja and Matysiak, 1991) تطابق دارد.

به طور کلی، نتایج نشان داد که وقتی از روش‌های نرم‌سازی آب سخت (فیزیکی و شیمیایی) استفاده شد، به طور کارآمدی از اثرات منفی تمامی کاتیون‌های موجود در حامل پاشش بر کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره جلوگیری به عمل آمد. به طوری که مقادیر ED_{50} گزارش شده در جدول ۳ (بجز فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی در ارتباط با کاربرد کربنات آهن) از مقدار ED_{50} گزارش شده در جدول ۱ (۳۵/۴۷ گرم ماده مؤثره در هکتار) برای کاربرد گلایفوسیت تنها با حامل آب مقطر به طور معنی داری کمتر بود. براساس داده‌های پتانسیل نسبی (R)، کاربرد روش‌های نرم‌سازی آب سخت به طور معنی‌داری باعث غلبه بر اثرات منفی تمامی کاتیون‌ها بر کارایی گلایفوسیت شد (جدول ۳). به منظور غلبه بر اثرات منفی کاتیون پتاسیم بر کارایی گلایفوسیت کاربرد سولفات آمونیوم و فسفات پتاسیم به ترتیب مؤثرترین و کم‌اثرترین روش بودند. هر چند، بین روش‌های کاربرد فسفات پتاسیم، میدان مغناطیسی، اسید سیتریک و نیترات آمونیوم در این ارتباط اختلاف معناداری مشاهده نشد. به منظور غلبه بر اثرات منفی کاتیون سدیم بر کارایی گلایفوسیت کاربرد سولفات آمونیوم و فسفات پتاسیم به ترتیب مؤثرترین و کم‌اثرترین روش بودند. هر چند، بین روش‌های کاربرد

سولفات آمونیوم، میدان مغناطیسی، اسید سیتریک و نیترات آمونیوم در این ارتباط اختلاف معناداری مشاهده نشد. به منظور غلبه بر اثرات منفی کاتیون منیزیم بر کارایی گلایفوسیت کاربرد سولفات آمونیوم و فسفات پتاسیم به ترتیب مؤثرترین و کم‌اثرترین روش بود. بین روش‌های کاربرد میدان مغناطیسی، اسید سیتریک و نیترات آمونیوم در این ارتباط اختلاف معناداری مشاهده نشد. همچنین، بین روش‌های فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی اختلاف معنی‌داری در این رابطه مشاهده نشد. در مورد کاربرد علف‌کش گلایفوسیت به همراه حامل حاوی کربنات کلسیم، نتایج نشان داد که کاربرد تمامی روش‌های نرم‌سازی آب سخت باعث غلبه بر اثرات منفی کاتیون کلسیم بر کارایی علف‌کش گلایفوسیت در کنترل علف‌هرز تاتوره شد. در این ارتباط نیز بهترین روش برای این منظور با کاربرد سولفات آمونیوم بدست آمد. هرچند، بین کاربرد سولفات آمونیوم و اسید سیتریک اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. اگرچه فسفات پتاسیم تأثیرگذار بود ولی تأثیر آن در مقایسه با دیگر روش‌ها کمترین بود. بین روش‌های کاربرد میدان مغناطیسی، اسید سیتریک و نیترات آمونیوم در این ارتباط اختلاف معناداری مشاهده نشد. در رابطه با کاربرد گلایفوسیت به همراه حامل حاوی کربنات آهن نتایج مشابهی با کاربرد آن به همراه حامل حاوی کربنات کلسیم بدست آمد. به طوری که کاربرد تمامی روش‌های نرم‌سازی آب سخت باعث غلبه بر اثرات منفی کاتیون آهن بر کارایی گلایفوسیت در کنترل تاتوره شد. در این ارتباط نیز بهترین روش برای این منظور با کاربرد سولفات آمونیوم بدست آمد. هرچند، بین کاربرد سولفات آمونیوم و کاربرد اسید سیتریک و نیترات آمونیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اگرچه فسفات پتاسیم تأثیرگذار بود ولی تاثیر آن در مقایسه با روش‌های دیگر کمترین بود. بین روش‌های کاربرد فسفات پتاسیم و میدان مغناطیسی در این ارتباط اختلاف معناداری مشاهده نشد. در تحقیقات متعدد قبلی، به حداقل‌رسانی اثرات ناسازگار کاتیون‌های فلزی موجود در آب سخت به وسیله روش‌های شیمیایی نرم‌سازی آب سخت بر کارایی علف‌کش‌های اسیدی ضعیف به خوبی مستند شده است. برای مثال، کاربرد روش‌های شیمیایی نرم‌سازی آب سخت قبل از افزودن علف‌کش‌های گلایفوسیت (Hajmohammadnia Ghalibaf *et al.*, 2014) و گلیفوزینت آمونیوم (Soltani *et al.*, 2011Pratt *et al.*, 2003 ;) ، ترالکوکسیدیم (Devilliers *et al.*, 2001) ، دایکمبا و توفوردی (Roskamp *et al.*, 2013a)، سافلوفنیسیل[1] (Roskamp *et al.*, 2013b)، توفوردی + ام‌سی‌پی‌اِ[2] (Nosratti et al., 2012)، ایمازتاپیر (Aliverdi *et al.*, 2014) به حامل آب سخت موجب غلبه بر اثرات منفی ناشی از کاتیون‌های موجود در حامل شده است. همان طور که قبلاً اشاره شد، ترکیباتی مانند سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم درون حامل پاشش تشکیل دو دسته یون می‌دهند.

یون سولفات حاصل از افزودن سولفات آمونیوم و یون نیترات حاصل از افزودن نیترات آمونیوم می‌توانند با اتصال به کاتیون‌های کلسیم، منیزیم، روی، سدیم و آهن در آب سخت، از تأثیر ناسازگار این کاتیون‌ها بر فعالیت زیستی علف‌کش‌های اسیدی ضعیف جلوگیری می‌کنند (Thelen *et al.*, 1995). یون آمونیوم حاصل از سولفات آمونیوم و نیترات آمونیوم نیز به مولکول علف‌کش اتصال می‌یابد. همان طور که قبلاً بیان شد، کمپلکس آمونیوم–علف‌کش قادر است از طریق تشدید مکانیسم تله اسیدی به سرعت و به میزان بالا از کوتیکول برگ نفوذ کند (Yoyng *et al.*, 2003). فسفات پتاسیم نیز دو نوع یون درون حامل پاشش تشکیل می‌دهد. یون فسفات می‌تواند همانند یون‌های سولفات و نیترات عمل کند. یون پتاسیم با اتصال به مولکول علف‌کش سبب تشکیل کمپلکس پتاسیم–علف‌کش شود که گاهی‌اوقات اثرات هم‌کاهی یا هم‌افزایی بسیار ناچیزی را بروز می‌دهد (Wills *et al.*, 1998). افزودن اسید سیتریک نیز قادر است تا به طور مؤثری کاتیون‌های آب سخت را از محلول خارج نماید. افزودن اسید سیتریک، به سبب اینکه در محلول یون‌های هیدروژن آزاد می‌سازد، موجب کاهش اسیدیته محلول پاشش می‌شود (Bernards *et al.*, 2005). اسیدی‌سازی محلول علف‌کش‌های اسیدی ضعیف باعث بهبود نفوذ گلایفوسیت از کوتیکول و بهبود انتقال آن از درون آوندهای آبکش می‌شود (Molin and Hirase, 2004).

نحوه عمل روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت با استفاده از میدان مغناطیسی در شکل ۲ پیشنهاد شده است. در مسیر شماره ۱، علف‌کش‌هایی با خاصیت اسید ضعیفی که درون آب به بخش‌های آنیونی و کاتیونی تفکیک می‌شوند، از طرف بخش آنیونی خود با کاتیون‌های آب سخت پیوند برقرار می‌کنند. در نتیجه، کمپلکس کاتیون–علف‌کش به وجود می‌آید که علی‌رغم اینکه نسبت به مولکول علف‌کش نامحلول بوده و به خوبی از طریق برگ‌های گیاهان جذب نمی‌شود (Penner, 2006)، بلکه تعداد مولکول علف‌کش کمی در محلول پاشش به طور آزاد وجود خواهد داشت تا به فعالیت زیستی خود بپردازد. در مسیر شماره ۲، عبور دادن آب سخت از میدان مغناطیسی (مغناطیسی‌سازی حامل) موجب تحریک فرآیند هسته‌زایی برای تولید بلور کربنات کلسیم می‌شود (Madsen, Coey and Cass, 2000 ; 2004). قبلاً، فرآیند هسته‌زایی برای تولید بلور کربنات‌سدیم، کربنات‌کلسیم و کربنات‌منیزیم از آب سخت عبور کرده از میدان مغناطیسی به وسیله بین و همکاران (Bin *et al.*, 2011) گزارش شده است.

1- Saflufenacil
2- MCPA

جدول ۳- مقادیر ED_{50} برای گلایفوسیت پاشیده شده با آب مقطر حاوی نمک‌های کربناتی مختلف در پاسخ به کاربرد روش‌های نرم‌سازی آب به منظور کنترل وزن خشک تاتوره

Table 3- ED_{50} values of glyphosate applied with distilled water + various carbonate salts in response to water softening methods application to control the dry weight of jimsonweed

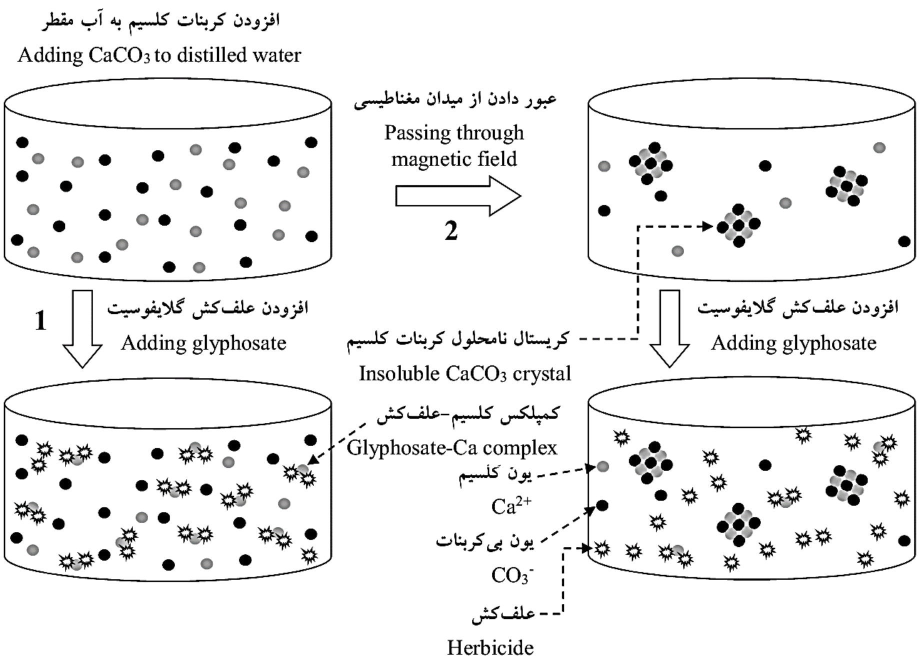
روش نرم‌سازی آب Water conditioner	حامل پاشش Spray carrier									
	آب مقطر + کربنات پتاسیم Distilled water + K_2CO_3		آب مقطر + کربنات سدیم Distilled water + Na_2CO_3		آب مقطر + کربنات منیزیم Distilled water + $MgCO_3$		آب مقطر + کربنات کلسیم Distilled water + $CaCO_3$		آب مقطر + کربنات آهن Distilled water + $Fe_2(CO_3)_3$	
	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R	ED_{50} (g a.e. ha^{-1})	R
شاهد Control	44.21 (5.36)	1.00	55.08 (11.93)	1.00	70.12 (8.53)	1.00	65.32 (8.46)	1.00	89.49 (10.90)	1.00
سولفات آمونیوم Ammonium sulfate	14.30 (1.42)	3.09	18.44 (2.05)	2.99	18.32 (3.64)	3.82	17.82 (1.93)	3.66	28.66 (3.20)	3.12
نیترات آمونیوم Ammonium nitrate	22.66 (3.63)	1.95	21.37 (2.02)	2.58	23.11 (2.86)	3.03	27.21 (3.58)	2.40	30.99 (3.47)	2.89
اسید سیتریک Citric acid	22.98 (3.70)	1.92	19.90 (2.59)	2.77	22.07 (3.12)	3.18	22.91 (3.41)	2.85	30.37 (3.91)	2.95
فسفات پتاسیم Potassium phosphate	26.78 (2.77)	1.65	30.01 (4.04)	1.84	40.31 (4.93)	1.74	28.51 (3.46)	2.28	195.18 (8.01)	1.73
میدان مغناطیسی Magnetic field	21.68 (2.66)	2.03	21.10 (2.26)	2.61	28.80 (6.63)	2.43	26.10 (3.12)	2.50	128.55 (8.39)	2.12

اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد هستند.

The standard errors are in parentheses.

همانطور که قبلاً ذکر شد، کربنات‌کلسیم در داخل آب تشکیل دو نوع یون می‌دهد که عبارتند از کاتیون کلسیم (Ca^{2+}) و آنیون کربنات (CO_3^{2-}). کاتیون‌ها و آنیون‌ها به‌ترتیب به وسیله قطب شمال و جنوب آهن‌ربا جذب می‌شوند (Rashed-Mohassel *et al.*, 2009). این عمل باعث می‌شود که تحت اثر میدان مغناطیسی کاتیون کلسیم و آنیون کربنات به تهیج آمده و در درون محیط آب متحد شده و تشکیل کریستال موقت کربنات‌کلسیم دهند (Coey and Cass, 2000). بدین ترتیب، این فرآیند از طریق کریستال‌سازی کربنات کلسیم، از حضور آزادانه کاتیون کلسیم در حامل پاشش آب سخت برای تشکیل کمپلکس کلسیم–علف‌کش جلوگیری می‌نماید. در نتیجه، مولکول علف‌کش به طور آزادانه درون حامل پاشش باقی می‌ماند تا به فعالیت زیستی خود یعنی کشتن علف‌هرز، بپردازد (شکل ۲).

به عنوان جمع‌بندی نهایی، وقتی از آب سخت، که دارای مقادیر بالایی از کاتیون (مانند منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم و آهن) است، برای تهیه محلول علف‌کش گلایفوسیت استفاده شد، کارایی آن در کنترل تاتوره کاهش یافت. قدرت ناسازگاری کاتیون‌های مورد آزمایش به ترتیب به صورت آهن > کلسیم > منیزیم > سدیم > پتاسیم بود. به همین سبب توصیه می‌شود که به منظور بهینه‌سازی مصرف علف‌کش‌های اسیدی ضعیف در چنین شرایطی از مواد افزودنی نرم‌کننده آب سخت استفاده شود. در این تحقیق مشخص شد که روش‌های نرم‌سازی آب سخت دارای کارایی مناسب در این جهت بوده‌اند. عملکرد سولفات آمونیوم و اسیدسیتریک در به حداقل رساندن واکنش کاتیون‌های مذکور با گلایفوسیت در مقایسه با دیگر روش‌های شیمیایی نرم‌سازی آب سخت بیشتر بود. اگرچه، روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت (میدان مغناطیسی) در مقایسه با فسفات پتاسیم و در برخی موارد از نیترات آمونیوم کارآمدتر ظاهر شد ولی در مقایسه با سولفات آمونیوم و اسید سیتریک دارای کارایی کمتری بود. از آنجایی که روش فیزیکی نهاده‌ی مصرف‌نشدنی است؛ لذا تقویت و بهینه‌سازی این روش دارای ارجحیتی در مقایسه روش‌های شیمیایی نرم‌سازی آب سخت، که نهاده‌ی مصرف‌شدنی‌اند، می‌باشد. از این‌رو، از نظر اکولوژیکی کاربرد روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت در مقایسه با روش‌های شیمیایی سالم‌تر و ایمن‌تر به نظر می‌رسد. به همین سبب، برای تقویت سودمندی روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت در تحقیقات آینده، پیشنهادات ذیل احتمالاً مؤثر واقع خواهند شد: الف) کاربرد مواد پارامغناطیس به منظور تسهیل هسته‌زایی و تحریک کریستال‌زایی سریع و بیشتر کربنات‌های نمکی در محیط آب و ب) کاربرد نانو- فیلتر در مسیر خروجی جریان محلول به منظور جداسازی کریستال‌های تشکیل شده.



شکل ۲- نحوه عمل پیشنهادی برای روش فیزیکی نرم‌سازی آب سخت با استفاده از یک میدان مغناطیسی

این مکانیسم در زمانی که از کربنات‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم یا آهن برای تهیه آب سخت استفاده شود نیز قابل تعمیم است.

Figure 2- Proposed mechanism for hard water softening physical method by a magnetic field

This mechanism is generalized when K_2CO_3, Na_2CO_3, $MgCO_3$, or $Fe_2(CO_3)_3$ is used to prepare hard water.

سپاسگزاری

نتایج ارائه شده در این مقاله حاصل بخشی از رساله دکتری با شماره طرح: ۳/۲۳۲۹۳ در رشته علوم علف‌های هرز دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد است. از خانم سمیه ابراهیم پور فرجی و آقای پرویز حسینی که در اجرای این تحقیق نقش مؤثری داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Akopian, S.N., & Aĭrapetian, S.N. (2005). A study of specific electrical conductivity of water by the action of constant magnetic field, electromagnetic field, and low-frequency mechanical vibrations. *Biofizika 50*(2): 265–270.
2. Aliverdi, A., Ganbari, A., Rashed-Mohassel, M.H., Nassiri-Mahallati, M., & Zand, E. (2014). Overcoming the antagonistic effect from spray carrier minerals on imazethapyr activity. *Agronomy Journal 106*(5): 1569–1573. https://doi.org/10.2134/agronj13.0514.
3. Amiri, M., & Dadkhah, A. (2006). On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 278*(1-3): 252–255. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046.
4. Andersen, R.N. (1968). *Germination and establishment of weeds for experimental purposes.* Weed Science Society of America, Urbana, IL, USA.
5. Bernards, M.L., Thelen, K.D., & Penner, D. (2005). Glyphosate efficacy is antagonized by manganese. *Weed technology*, *19*(1), 27-34. https://doi.org/10.1614/WT-03-193R2.
6. Bin, G.U.O., HAN, H.B., & Feng, C.H.A.I. (2011). *Influence of magnetic field on microstructural and dynamic properties of sodium, magnesium and calcium ions*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21, s494-s498. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61631-2.
7. Chang, K.T., & Weng, C.I. (2006). The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *Journal of Applied Physics 100*(4): 043917. https://doi.org/10.1063/1.2335971.
8. Coey, J.M.D., & Cass, S. (2000). Magnetic Water Treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 209(1-3): 71–74.
9. Devilliers, B.L., Kudsk, P., Smit, J.J., & Mathiassen, S.K. (2001). Tralkoxydim: adjuvant, MCPA and other effects. *Weed Research 41*(6): 547-556. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00257.x.
10. Devkota, P., & Johnson, W.G. (2016). Effect of carrier water hardness and ammonium sulfate on efficacy of 2,4-D choline and premixed 2,4-D choline plus glyphosate. *Weed Technology 30*(4): 878-887. https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00040.1.
11. Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., & Mohamed, B.A. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research 40*(10): 1941-1950. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.03.013.
12. Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., & Keddam, M. (2001). Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research 35*(13): 3249-3259. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00010-0.
13. Hajmohammadnia Ghalibaf, K., Rashed Mohassel, M. H., Nassiri Mahallati, M., Zand, E., & Kudsk, P. (2014). Investigation on the influence of spray tank water quality on glyphosate performance and eliminate the adverse effects. *Weed Research Journal 6*(2): 105–120.
14. Hall, G.J., Hart, C.A., & Jones, C.A. (2000). Plants as sources of cations antagonistic to glyphosate activity. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science 56*(4): 351-358. https://doi.org/10.1002/(SICI)1526-4998(200004)56:4<351::AID-PS151>3.0.CO;2-A.
15. Hoffmann, W.C., Bagley, W.E., Fritz, B.K., Lan, Y., & Martin, D.E. (2008). Effects of water hardness on spray droplet size under aerial application conditions. *Applied Engineering in Agriculture 24*(1): 11-14.
16. Khanjani, M., Mahmoodi. S., & Jami-Al-Ahmadi, M. (2010). Effect of density and relative time of emergence of Jimsonweed (*Datura stramonium* L.) on yield and yield components of Chittibeen (*Phaseolus vulgaris* L.). *Electronic Journal of Crop Production 3*(2): 215–228.
17. Kudsk, P., & Mathiassen, S.K. (2007). Analysis of adjuvant effects and their interactions with variable application parameters. *Crop Protection 26*(3): 328-334. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.06.012.
18. Madsen, H.E.L. (2004). Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water. *Journal of Crystal Growth 267*(1-2): 251-255. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.03.051.
19. Mahoney, K.J., Nurse, R.E., & Sikkema, P.H. (2014). The effect of hard water, spray solution storage time, and ammonium sulfate on glyphosate efficacy and yield of glyphosate-resistant corn. *Canadian Journal of Plant Science 94*(8): 1401-1405. https://doi.org/10.4141/cjps-2014-13.
20. Matysiak, R., & Nalewaja, J.D. (1999). Temperature, adjuvants, and UV light affect sethoxydim phytotoxicity. *Weed Technology 13*(1): 94-99. https://doi.org/10.1017/S0890037X00044973.

21. Molin, W.T., & Hirase, K. (2004). Comparison of commercial glyphosate formulations for control of prickly sida, purple nutsedge, morningglory and sicklepod. *Weed Biology and Management*, *4*(3): 136-141. https://doi.org/10.1111/j.1445-6664.2004.00130.x.
22. Moosa, G.M., Khulaef, J.H., Khraibt, A.C., Shandi, N.R., & Al-Braich, M.S.K. (2015). Effect of magnetic water on physical properties of different kind of water, and studying its ability to dissolving kidney stone. *Journal of Natural Sciences Research*, *5*(18):85–94.
23. Nalewaja, J.D., & Matysiak, R. (1991). Salt antagonism of glyphosate. *Weed Science 39*(4): 622-628. https://doi.org/10.1017/S0043174500088470.
24. Nandula, V.K., Poston, D.H., Reddy, K.N., & Koger, C.H. (2007). Formulation and adjuvant effects on uptake and translocation of clethodim in bermudagrass (*Cynodon dactylon*). *Weed Science 55*(1): 6-11. https://doi.org/10.1614/WS-06-024.1.
25. Nosratti, I., Alizade, H., & Mashhadi, H.R. (2012). Effect of some adjuvants in reducing antagonistim of spray carrier water cations to 2, 4-D+MCPA efficacy on licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.). *Annals of Biological Research 3*(6): 2631-2635.
26. Osati, K., & Nahvinia, M.J. (2016). Spatial variations of ground water quality in Birjand Plain for agriculture. *Environment and Water Engineering 2*(1): 25-36. (In Persian with English abstract)
27. Patton, A.J., Weisenberger, D.V., & Johnson, W.G. (2016). Divalent cations in spray water influence 2, 4-D efficacy on dandelion (Taraxacum officinale) and broadleaf plantain (*Plantago major*). *Weed Technology 30*(2): 431-440. https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00120.1.
28. Penner, D. (2006). *Novel water conditioning agents for glyphosate*. In North Central Weed Science Society Proceedings (Vol. 61, p. 150).
29. Pratt, D., Kells, J.J., & Penner, D. (2003). Substitutes for ammonium sulfate as additives with glyphosate and glufosinate. *Weed Technology 17*(3): 576-581. https://doi.org/10.1614/0890-037X(2003)017[0576:SFASAA]2.0.CO;2.
30. Rao, V.S. (2000). *Principles of weed science, 2nd ed*. Science Publishers, Enfield, NH.
31. Rashed-Mohassel, M.H., Aliverdi, A., & Ghorbani, R. (2009). Effects of a magnetic field and adjuvant in the efficacy of cycloxydim and clodinafop-propargyl on the control of wild oat (*Avena fatua*). *Weed Biology and Management 9*(4): 300–306. https://doi.org/10.1111/j.1445-6664.2009.00354.x.
32. Ritz, C., Baty, F., Streibig, J.C., & Gerhard, D. (2015). Dose-response analysis using R. *PloS One 10*(12): e0146021. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021.
33. Roskamp, J.M., Chahal, G.S., & Johnson, W.G. (2013a). The effect of cations and ammonium sulfate on the efficacy of dicamba and 2,4-D. *Weed Technology 27*(1): 72–77. https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00106.1.
34. Roskamp, J.M., Turco, R.F., Bischoff, M., & Johnson, W.G. (2013b). The influence of carrier water pH and hardness on saflufenacil efficacy and solubility. *Weed Technology 27*(3): 527–533. https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00154.1.
35. Scroggs, D.M., Miller, D.K., Stewart, A.M., Leonard, B.R., Griffin, J.L., & Blouin, D.C. (2009). Weed response to foliar coapplications of glyphosate and zinc sulfate. *Weed Technology 23*(1): 171-174. https://doi.org/10.1614/WT-08-103.1.
36. Shahverdi, F., Montazeri, M., & Dianat, M. (2010). The effect of ammonium sulphate on efficacy of a few weak acidic herbicides. *Iranian Journal of Weed Science 6*(1): 113-121. (In Persian with English abstract)
37. Soltani, N., Nurse, R., Robinson, D., & Sikkema, P. (2011). Effect of ammonium sulfate and water hardness on glyphosate and glufosinate activity in corn. *Canadian Journal of Plant Science 91*(6): 1053-1059. https://doi.org/10.4141/cjps2011-047.
38. Somervaille, A., Betts, G., Gordon, B., Green, V., Burgis, M., & Henderson, R. (2012). *Adjuvants: oils, surfactants and other additives for farm chemicals*. Grains Research and Development Corporation, Kingston, Australia.
39. Tai, C.Y., Chang, M.C., Shieh, R.J., & Chen, T.G. (2008). Magnetic effects on crystal growth rate of calcite in a constant-composition environment. *Journal of Crystal Growth 310*(15): 3690-3697. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.05.024.
40. Thelen, K.D., Jackson, E.P., & Penner, D. (1995). The basis for the hard-water antagonism of glyphosate activity. *Weed Science 43*(4): 541-548. https://doi.org/10.1017/S0043174500081613.
41. Toledo, E.J., Ramalho, T.C., & Magriotis, Z.M. (2008). Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *Journal of Molecular Structure 888*(1-3): 409-415. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010.
42. Wills, G.D., Hanks, J.E., Jones, E.J., & Mack, R.E. (1998). Effect of oil adjuvants and nitrogen fertilizer on the efficacy of imazethapyr applied at conventional and ultralow spray volumes. *Weed Technology 12*(3): 441-445. https://doi.org/10.1017/S0890037X00044110.
43. Young, B.G., Knepp, A.W., Wax, L.M., & Hart, S.E. (2003). Glyphosate translocation in common lambsquarters (*Chenopodium album*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) in response to ammonium sulfate. *Weed Science 51*(2): 151-156. https://doi.org/10.1614/0043-1745(2003)051[0151:GTICLC]2.0.CO;2.